

引文格式:赵锦华,赵菊敏,李灯熬,等.精密单点定位场景下基于动态多路径半球图模型的多径效应抑制[J].太原理工大学学报,2026,57(2):356-364.

ZHAO Jinhua, ZHAO Jumin, LI Dengao, et al. Multipath mitigation in precise point positioning based on dynamic multipath hemispherical map[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2026, 57(2): 356-364.

精密单点定位场景下基于动态多路径半球图模型的多径效应抑制

赵锦华^{1a,2,3}, 赵菊敏^{1a,2,3}, 李灯熬^{1b,2,3}, 毋凡铭^{1b,2,3}

(1a. 太原理工大学 电子信息与光学工程学院, 1b. 计算机科学与技术学院(大数据学院), 山西 太原; 2. 大数据融合分析与应用山西省重点实验室, 山西 太原; 3. 山西省智能感知工程研究中心, 山西 太原)

摘 要:【目的】多径效应作为伪距和载波相位观测过程中的主要误差来源之一,严重影响复杂环境下的精密单点定位精度。传统多路径半球图模型(Multipath Hemispherical Map, MHM)对接收机周围的多径误差进行建模用于后续观测日的多径实时校正时,提高残差划分网格的分辨率不仅增大了计算成本,也使得许多网格中的残差数量太少从而导致残差均值结果可靠性下降。针对该问题,提出动态多路径半球图模型(Dynamic Multipath Hemispherical Map, D-MHM)进行两次多径建模。【方法】设置残差阈值来保证网格的残差数量充足,第一次建模使用较高分辨率网格建模得到高精度多径校正值,第二次建模时对不满足阈值未被建模的区域使用较低分辨率网格进行建模,避免多径校正时因对应网格的校正值缺失而导致多径校正率下降的问题。首先介绍了从观测结果中提取多径残差的过程,然后探究了网格分辨率等参数对D-MHM建模效果的影响,最后评估了它在多径残差校正率和定位精度改善方面的性能。【结果】实验结果表明,相较于MHM,使用D-MHM模型在多径残差的校正性能方面可以提升大约7.7%,东、北、天三向的定位精度改善效果分别可以提升8.1%、5.6%、6.7%。该方法在接收机周围的信号环境探测与地震波监测等领域也有重要价值。

关键词:GNSS;精密单点定位;多路径效应;残差阈值;动态模型

中图分类号:TN967.1 **文献标识码:**A

DOI: 10.16355/j.tyut.1007-9432.20240380

文章编号:1007-9432(2026)02-0356-09

Multipath Mitigation in Precise Point Positioning Based on Dynamic Multipath Hemispherical Map

ZHAO Jinhua^{1a,2,3}, ZHAO Jumin^{1a,2,3}, LI Dengao^{1b,2,3}, WU Fanming^{1b,2,3}

(1a. College of Electronic Information and Optical Engineering, 1b. College of Computer Science and Technology (College of Data Science), Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi, China; 2. Key Laboratory of Big Data Fusion Analysis and Application of Shanxi, Taiyuan, Shanxi, China; 3. Intelligent Perception Engineering Technology Center of Shanxi, Taiyuan, Shanxi, China)

Abstract: 【Purposes】As an important error source in pseudo-range observation and carrier phase observation, multipath effect seriously affects the precision of single point positioning in complex environment. Multipath hemispherical map (MHM) is a of making use of the spatial repeatability of mul-

收稿日期:2024-05-18;修回日期:2024-06-08

基金项目:山西省关键核心技术和共性技术研发攻关专项项目(2020XXX007);山西省重点研发计划项目(202102020101001)

第一作者:赵锦华,硕士研究生,(E-mail)auhniyz@163.com

通信作者:李灯熬,博士,教授,主要从事空天地一体化与导航技术研究,(E-mail)lidengao@tyut.edu.cn

tipath signals to construct multipath models and suppress multipath effects. This model needs to model multipath errors around the receiver for real-time correction of multipath on subsequent observation days. The improvement of the MHM model lies in the accuracy of multipath correction by reducing the area of the grids. However, the calculation cost is increased and the number of residuals in many grids is too small, resulting in the limited reliability of the residual mean results. To solve this problem, the Dynamic Multipath Hemispherical Map (D-MHM) with two modeling processes is proposed. **【Methods】**In the proposed D-MHM model, the residual threshold was set to ensure adequate residual quantities. According to high-precision results obtained from higher-resolution grid modeling, in the second modeling, a lower resolution grid was used to model the unmodeled region that does not meet the threshold value, so as to avoid the problem of the decrease of the multipath correction rate owing to the missing correction value of the corresponding grid. In this paper, the process of extracting multipath residuals from observations was explained. Then, the influences of grid resolution and other parameters on D-MHM modeling effect were explored. At last, its multipath correction effect was evaluated. **【Results】**The experimental results show that, compared with MHM, the D-MHM model can improve the performance of multipath correction rate by about 7.7%. The positioning accuracy of east, north, and up can be improved by 8.1%, 5.6%, and 6.7%, respectively. This method is also valuable in the fields of signal environment detection around the receiver and seismic wave monitoring.

Keywords: GNSS; precise point positioning; multipath effect; residual threshold; dynamic model

全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)可为全球用户提供高精度、全天候、实时性的定位、导航及授时服务^[1]。GNSS精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)^[2,3]被认为是一项高效可靠的精密定位及测量技术,广泛应用于建筑形变监测、地理测绘、灾害预警^[4,5]等领域。目前毫米级甚至更高精度要求的定位场景不断增加,为获得更加精准的定位结果需要对GNSS定位过程中的各种误差进行针对性处理,其中卫星钟差、电离层延时误差、对流层延时误差等可借助观测值的适当组合或利用适当的外部模型进行消除^[6]。而接收机周边环境的不确定性导致多径误差无法利用外部模型进行准确地描述,需要用特殊的手段对其进行处理^[7,8]。针对此问题的多径效应抑制技术研究有助于提升接收机定位精度,为GNSS提供更好的应用前景。

利用多径空间重复性进行多径抑制的方法具有实时性强、应用成本低的特点,它只要确定卫星信号的来源方位角和高度角,在观测值中减去前期记录的对应方位的多径残差值就可以对当前观测值进行多径实时校正。COHEN和PARKINSON在1991年首次提出多径球谐模型^[9],对多径误差进行建模。FUHRMANN在2015年提出多径堆叠模型^[10],使用等面积的网格分配多径残差并加入统计

学检验过程以提高网格内残差均值结果的可靠性。DONG et al^[11]在2016年把这类基于“查找表”思维得到的多径误差模型统称为多路径半球图(Multipath Hemispherical Map, MHM)模型,并对MHM和恒星滤波(Sidereal Filtering, SF)方法^[12]的多径抑制效果进行比较,得出SF在强高频多径环境中表现更好,而MHM更适合实时多径减少^[11]。2016年CAI et al^[13]的研究表明MHM方法不仅能用于静态场景,对于一些多径环境稳定的移动平台也同样适用。2019年ZHENG et al^[14]研究了基于PPP技术的多径误差校正方法,根据高度角的不同对各区域的多径残差使用不等分辨率的网格进行划分,构建了一种M-MHM多径模型,对高仰角处多径抑制效果差的问题提出了解决方案。2019年WANG et al^[15]利用趋势面分析方法对网格内部的残差分布做了更细致的分析和研究,提出T-MHM模型用于多径校正,2020年在保持该模型优势的基础上,又融入高级趋势面分析方法提出AT-MHM模型^[16]。2021年ZOU在研究网格内部残差分布时使用顶点的残差计算网格内部残差,得到多点半球网格模型(MHGM),并在水坝变形监测的实际应用中验证了其多径校正效果^[17]。2023年,REN et al^[18]提出具有地理高程约束的MHM模型,减弱了非视距信号等对模型造成的影响。YUAN et al^[19]引入载噪比参

数辅助建模,增强了多径误差模型的抗干扰性。综合上述研究结果,基于多路径半球图模型的多径误差校正首先将接收机上空区域划分成网格,利用多径信号的方位角和高度角作为索引寻找每个残差值对应的网格位置,然后分别计算每个网格内所有残差的算术平均值作为该区域的多径校正值。理论上,网格划分的面积越小,多径误差建模的精度越高,但是无限制地缩小网格划分间隔会极大地增加计算量,其多径抑制效果也得不到过多提升。

针对以上问题本文提出一种动态多路径半球图模型(Dynamic Multipath Hemispherical Map, D-MHM)用于多径误差校正,采用等面积原则划分网格,计算网格内残差均值前设置残差数量阈值以保证多径校正值的准确性。为了提高模型精度,在第一次多径建模时采用高分辨率网格进行建模,对于满足残差阈值的网格计算残差均值并得到它们的高精度多径校正值。为了保证模型的覆盖范围,对于第一次建模时因不满足阈值条件而未得到建模的网格使用较低的分辨率进行二次划分,在保留第一次建模高精度误差校正值的的同时,将二次建模后得到的其他区域的误差校正值补充进去,得到一个完整的多径误差校正表,用于定位解算时的多径实时校正。实验部分探究了不同网格分辨率、残差数量阈值及建模天数对多径误差校正率和定位精度的影响,验证 D-MHM 模型对多径效应抑制的有效性和实用性。

1 PPP 多径误差提取

PPP 多径误差提取过程需要利用参数估计和外部模型等对观测过程中的误差项进行尽可能精确的估计和消除。假设 GNSS 原始伪距 P^s 和载波相位 φ^s 观测方程分别表示为:

$$P_s = \rho_s + c(\delta_r - \delta_s) + I + T + M_s + \varepsilon. \quad (1)$$

$$\varphi_s = \rho_s + c(\delta_r - \delta_s) - I + T + \lambda \cdot N + m_s + \xi. \quad (2)$$

式中, s 表示卫星编号, r 代表接收机, ρ_s 是信号从卫星到接收机传播路径的几何距离, δ_r 和 δ_s 分别是接收机钟差和卫星钟差, c 是光速常量, I 是信号传播路径上的电离层引起的延迟量, T 是信号穿过对流层导致的延迟量, N 是载波相位模糊度, λ 是载波的波长, M_s 和 m_s 分别表示伪距观测量和载波相位观测量中的多径误差项, ε 和 ξ 分别表示伪距和载波相位观测量中,除了以上延迟项之外由接收机硬件误差、随机噪声等其他误差源引起的延迟量总合。

接收机位置解算使用卡尔曼滤波估计算法,将

观测周期内的平均解算结果作为其真实位置坐标。将上述求解和估计得到的参数代入式(1)、(2),可以得到剩余的残差项:

$$\eta_s = P_s - \rho_s - c(\delta_r - \delta_s) - I - T. \quad (3)$$

$$\phi_s = \varphi_s - \rho_s - c(\delta_r - \delta_s) + I - T - \lambda \cdot N. \quad (4)$$

其中 η_s 和 ϕ_s 分别是伪距和载波相位观测值的残差项。经过上述处理,如果各参数都被精确估算或建模,理论上提取得到的残差便仅包含多径误差 M_s (m_s) 及随机噪声误差 $\varepsilon(\xi)$ 。

2 基于动态多路径半球图模型的多径校正

2.1 网格划分与统计学检验

利用提取的多径残差, D-MHM 在分配残差值的过程中使用等面积网格,其网格高度角间隔固定,即特定的高度角 e_i 处的球面弧长相等,若要使网格面积相等,特定高度角处对应的方位角间隔 a_i 可以表示为

$$a_i = \frac{a_0}{\cos e_i}. \quad (5)$$

其中 a_0 是高度角为 0° 时对应的方位角间隔。实际上等面积划分网格时设置的方位角分辨率指的是 $e_i = 0$ 时对应的方位角间隔 a_0 , 将其确定之后,随着高度角 e_i 的增加,方位角间隔 a_i 也不断增大,此时对应高度角一周可划分得到的网格个数 C_i 为

$$C_i = \text{Round}\left(\frac{360^\circ}{a_i}\right). \quad (6)$$

其中 round 表示取整运算。

网格划分之后,利用每个多径残差值各自的高度角和方位角参数作为索引将其分配到对应方向的网格中,利用所有残差值的算术平均值计算结果作为每个网格的模型值。在此过程中,如果网格内残差样本量太小,均值计算结果的可靠性就会受到一定影响,同时残差异常值的存在也会影响结果的准确性,因此在建模前进行必要的统计学检验,可以提高多径模型的可靠性,进一步提升模型的多径抑制效果。

假设包含 n 个样本的一组残差序列 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 中的每个样本相互独立且服从同一正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$, 其均值 $\bar{X}$ 服从正态分布 $N(\mu, \sigma^2/n)$, 并且其期望 $E(\bar{X}) = \mu$, 标准差 $\sigma_{\bar{X}} = \sigma/\sqrt{n}$ 。此时,均值 μ 在置信度 $1-\alpha$ 下的置信区间为

$$\left(\bar{X} - u_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \bar{X} + u_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right). \quad (7)$$

其中, $u_{\alpha/2}$ 表示标准正态分布的 $\alpha/2$ 上侧分位数, 此时确定绝对误差

$$e = u_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \quad (8)$$

在一定的置信度和绝对误差下, 根据公式^[20]

$$n_{\min} = \text{round}\left(\frac{u_{1-\alpha/2}^2 \cdot \sigma^2}{e^2}\right). \quad (9)$$

可以求得用于计算网格内残差均值所需要s的最小残差个数 $n_{\min}$, 即残差数量阈值。若网格内的残差个数满足该下限值, 才认为计算出的残差均值可信, 可以代表整个网格的残差分布。若残差个数少于该值, 则不对该网格进行建模。

在确定了网格建模所需的最小残差个数之后, 利用 3σ 准则寻找网格内的异常残差值。对于同一网格中包含异常值和不包含异常值的两个残差集合, 利用 F 检验来判断会对样本方差造成影响的异常值并剔除。

异常值的检测与剔除, 提高了网格模型值的可靠性, 但是导致部分网格的残差个数少于 $n_{\min}$, 这部分网格在第一次建模后没有多径校正结果。重复以上的统计学检验步骤, 对所有残差个数满足要求的网格进行建模, 并把所有的模型值保存下来, 便完成了多径残差的第一次建模。

2.2 动态多路径半球图模型构建

在多径残差第一次建模过程中, 网格分辨率设置更高, 用以保证模型值的精度, 但是由于残差阈值的设置以及异常值剔除的操作, 有一些网格由于内部残差个数不满足残差阈值 $n_{\min}$ 要求而没有保存模型值, 模型的覆盖范围受到了影响。这导致后续残差校正过程中遇到来自该方向的多径信号时, 没有对应的多径校正结果用于多径误差校正。

针对此问题, D-MHM 模型对于第一次建模后没有保留多径校正值的空网格使用更低分辨率进行二次网格划分建模。假设第一次建模后包含残差值但未被建模的网格数量为 j , 每个网格中的残差数量为 n_i , i 代表未建模网格序号, 则每个未建模网格的平均剩余残差数为

$$\bar{n} = \frac{\sum_{i=1}^j n_i}{j}. \quad (10)$$

第二次建模网格划分的高度角间隔动态调整为

$$E' = \alpha \cdot E \cdot \frac{n_{\min}}{\bar{n}} = \alpha \cdot \frac{j \cdot n_{\min}}{\sum_{i=1}^j n_i} E. \quad (11)$$

式中 E 和 E' 分别是前后两次网格划分时的高度角间隔, 方位角间隔依然随高度角相应改变, α 是一个比例因子。

以上过程实现了二次建模时网格分辨率的动态调整。对于二次建模后的网格重复第一次建模时的统计学检验过程, 得到这些网格对应的多径校正结果并存储下来, 填补多径误差校正表中第一次建模时未建模区域对应的多径校正结果空白。基于 D-MHM 的多径误差校正完整过程如图 1 所示。

通过二次建模, 大部分第一次建模过程中缺失建模结果的区域也得到建模, 最终得到的多径残差校正表既包含了一次建模中大部分网格的高精度模型值, 也包含了通过二次建模得到的大部分剩余网格的模型值。与传统的 MHM 模型相比, D-MHM 在不牺牲模型精度的前提下, 进一步扩大了建模范围, 能更大程度地减少多径效应对定位结果的干扰。

3 实验结果与分析

3.1 数据获取

如图 2 所示, 为了验证 D-MHM 模型对多径信号的抑制效果, 将鼎耀科技型号为 DY-GG-BR044P00F 的三系统七频收发天线放置在太原理工大学明向校区信息楼楼顶, 使用华测 i50 型号 GNSS 信号接收机采集 2023 年中年积日 (DOY) 为 131~160 的连续 30 个观测日的数据用于实验验证, 数据采样间隔为 1 s。

3.2 数据处理

对于所有采集到的原始观测数据的处理, 全部基于开源数据处理软件 RTKLIB 及其二次开发完成。其中, 电离层延迟使用非差非组合模型消除, 卫星钟差和精密轨道从 IGS 提供的实时精密轨道及钟差产品中获取。另外, 相对论效应、潮汐项、天线相位中心误差等也可以通过输入的修正文件进行去除, 载波相位模糊度固定为浮点解。详细数据处理策略如表 1 所示。

选取一个观测日的载波相位数据绘制多径残差天空图, 如图 3 所示, 可以发现载波相位残差大小基本在 $-0.02 \sim 0.02$ m 之间, 并且在低仰角处的多径干扰更为严重。

图 4 是载波相位残差统计学分布图, 图中多径残差分布近似符合正态分布的概率密度曲线, 这说明网格中多径残差的分布近似服从正态分布。

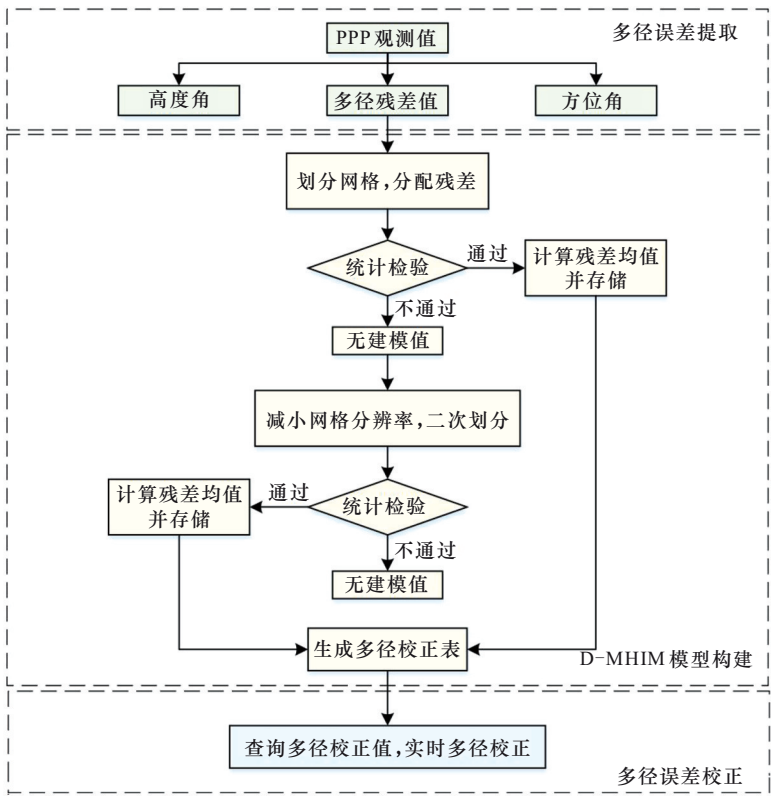


图 1 基于D-MHM的多径误差校正流程图

Fig.1 Flowchart of D-MHM



图 2 数据采集环境

Fig.2 Experimental scene

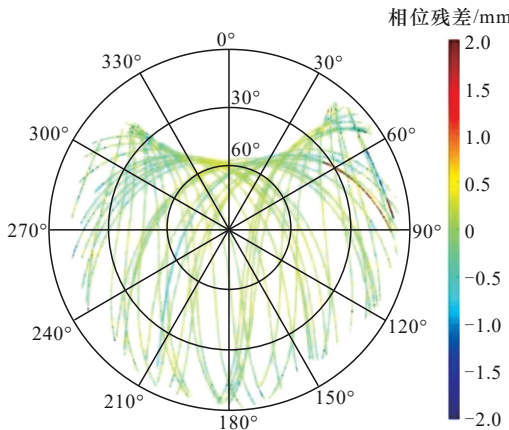


图 3 多径残差天空图

Fig.3 Sky map of multipath residuals

表 1 多径误差提取策略

Table 1 Residual extraction processing strategy

待处理项	处理方法
GNSS系统	GPS
采样频率	1Hz
卫星截止高度角	5°
卫星轨道误差	IGS精密轨道产品
卫星时钟误差	IGS精密时钟产品
电离层延迟误差	非差非组合模型
对流层延迟误差	天顶湿延迟
天线相位中心误差	igs14.atx
潮汐项	IERS convention 2010
相对论效应等	外部模型改正

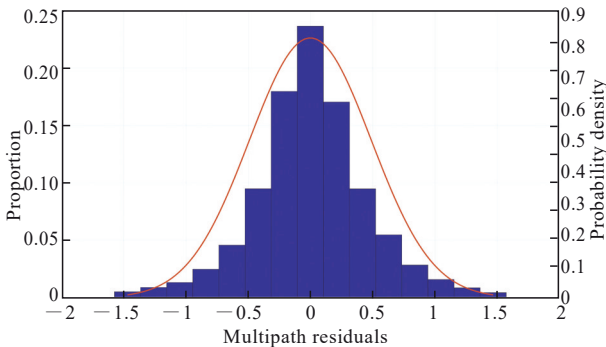


图 4 多径残差分布直方图

Fig.4 Residual statistical distribution

3.3 实验结果分析

3.3.1 最佳网格分辨率分析

使用DOY131~135的数据进行建模,将残差阈值 $n_{\min}$ 设置为15,设置不同的网格分辨率来探究网格分辨率对D-MHM模型多径校正效果的影响。表2展示了不同分辨率下,利用D-MHM和MHM

两种模型进行多径校正前后的多径残差大小和校正率。设计了 $2^{\circ}\times 2^{\circ}$ 、 $1^{\circ}\times 2^{\circ}$ 、 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 、 $0.5^{\circ}\times 1^{\circ}$ 、 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 共五种不同的分辨率大小用于MHM建模和D-MHM一次建模时的网格划分,而D-MHM模型在二次网格划分时的分辨率是将第一次划分时的方位角间隔对应扩大两倍。

表2 模型校正前后多径残差大小(单位:m)及不同网格分辨率下的多径校正比率
Table 2 Residuals (unit: m) and multipath error correction rates with different grid resolutions

项目	网格分辨率 $Ele\times Azi(^{\circ})$									
	2×2		1×2		1×1		0.5×1		0.5×0.5	
未校正	0.008 3	校正比率	0.008 3	校正比率	0.008 3	校正比率	0.008 3	校正比率	0.008 3	校正比率
MHM	0.005 5	33.7%	0.005 2	37.3%	0.004 8	42.2%	0.004 7	43.4%	0.004 6	44.6%
D-MHM	0.005 3	36.8%	0.005 0	39.6%	0.004 4	43.1%	0.004 9	38.0%	0.005 6	25.5%

模型的多径残差校正率用于显示不同模型的多径校正效果,基于公式 $(a_1-a_2)/a_1\times 100\%$,其中 a_1 和 a_2 分别表示校正前后的多径残差标准差。通过观察图5中对DOY136的数据进行多径校正的结果发现,MHM模型的校正比率随着网格分辨率的增加而增加,D-MHM模型的残差校正比率先增加后急剧减小,在 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 时的校正比率最高,当网格划分进一步细化时,其多径校正效果反而不如传统的MHM模型。这是因为减小网格面积之后D-MHM模型中很多网格内的残差数量无法满足建模阈值的要求,产生了大量缺失多径校正值的网格,多径校正时对应位置的多径信号没有得到处理。因此,为了保证D-MHM模型的多径校正效果,需要根据网格大小设置合理的残差阈值。

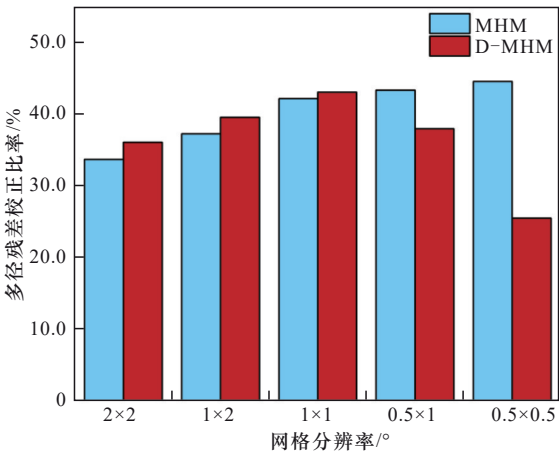


图5 不同模型分辨率对残差校正率的影响
Fig.5 Effects of different model resolutions on multipath correction rate

3.3.2 残差阈值分析

为了探究残差阈值大小与多径校正效果的关系,选择三种分辨率的网格进行建模,分别为 $2^{\circ}\times$

2° 、 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 、 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 。不同分辨率下D-MHM的多径残差校正比率如图6所示。

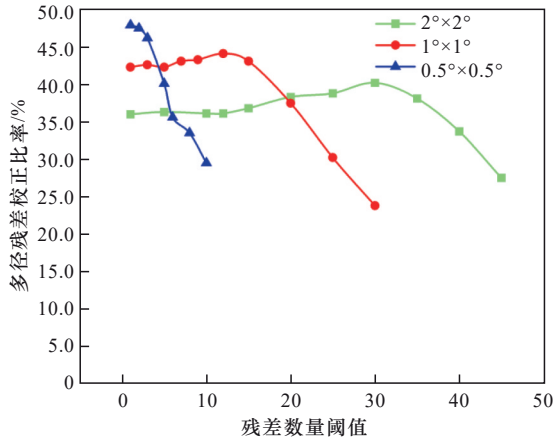


图6 D-MHM的多径残差校正率与残差阈值的关系
Fig.6 Relationship between multipath correction rate and residual threshold of D-MHM

对于 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 的网格,随着 $n_{\min}$ 的增加,多径残差校正率先增大后减小,在 $n_{\min}$ 大约为12时的校正效果最好。对于 $2^{\circ}\times 2^{\circ}$ 的网格,多径残差校正率有着类似的变化趋势,但是其残差阈值 $n_{\min}$ 大约是30。而对于 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 的网格,多径校正比率随着 $n_{\min}$ 的增大不断降低,残差阈值的设置对于其多径校正效果提升作用不大。

3.3.3 最佳建模天数分析

为了得到多径校正效果最佳的建模天数,选择分辨率为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 的网格,设置残差阈值 $n_{\min}$ 为12,选取DOY131~144中不同天数的数据进行建模,并对紧接着后一天的原始观测值进行多径校正,多径残差校正率结果如图7和表3所示。

从图7中的数据趋势可以看出,两种模型建模时使用的数据天数越长,多径残差校正率越高。对于MHM模型,建模天数设定为5天时校正效果通

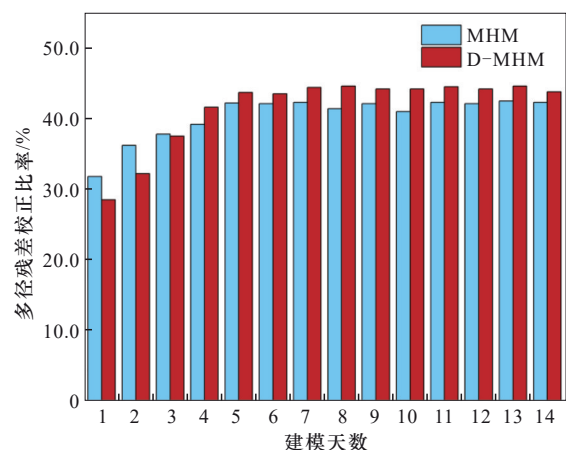


图 7 不同建模天数对残差校正率的影响
Fig.7 Effect of days on multipath correction rate

常能达到最佳状态,而 D-MHM 模型的最佳建模天

表 3 不同建模天数时 MHM 和 D-MHM 模型的多径残差校正比率
Table 3 Multipath correction rate of MHM and D-MHM for different modeling days %

模型	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
MHM	31.8	36.2	37.8	39.2	42.2	42.1	42.3	41.4	42.1	41.0	42.3	42.1	42.5	42.3
D-MHM	28.5	32.2	37.5	41.6	43.7	43.5	44.4	44.6	44.2	44.2	44.5	44.2	44.6	43.8

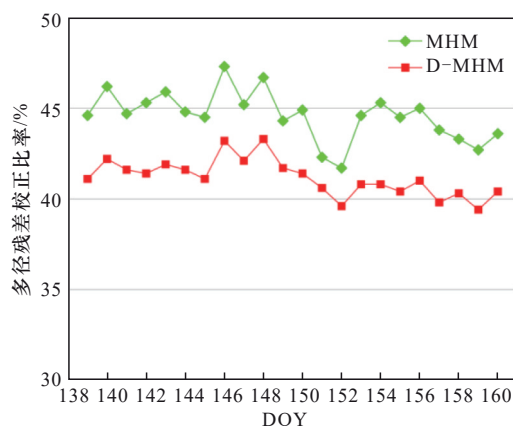


图 8 D-MHM 与 MHM 模型的多径校正率
Fig.8 Multipath correction rates of D-MHM and MHM

在后续的 22 个观测日中,D-MHM 模型在多径误差校正方面展现出更佳表现。其多径残差校正率更加显著,相较于原始的 MHM 模型,校正效果提升了大约 7.7%。同时,接收机周围环境并非是完全不变的,随着时间的推移会发生细微变化,因此两种模型的多径残差校正率较最初几天都有一定减小。为了解决这个问题,应该定期使用最新的观测数据对模型进行更新以防止误差的累积,保证模型稳定性。

如图 9 所示,将使用 D-MHM 和 MHM 模型进行多径误差校正后的结果用于定位解算过程,接收机在东、北、天三个方向上的定位误差相较于未进行多径校正前的结果都有所下降。其中使用 D-MHM 模型后的定位精度更高,尤其是在定位结果

数大约为 8 天。在合适的残差阈值设置前提下,D-MHM 模型的多径误差校正率普遍优于 MHM 模型。同时可以发现,建模天数超过最佳天数后继续增加时,模型的校正效果变化并不明显,因此并非建模天数越长校正效果越好,这反而会增加不必要的计算量。

3.3.4 D-MHM 多径抑制性能分析

通过上述研究,确定了 D-MHM 模型在网格分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 时的最佳残差数量阈值为 10,最佳建模天数为 8 d。根据此结果,使用 8 d 的数据构建 MHM 模型和 D-MHM 模型,对后续连续观测日的观测结果进行多径校正,两种模型的多径校正结果如图 8 所示。

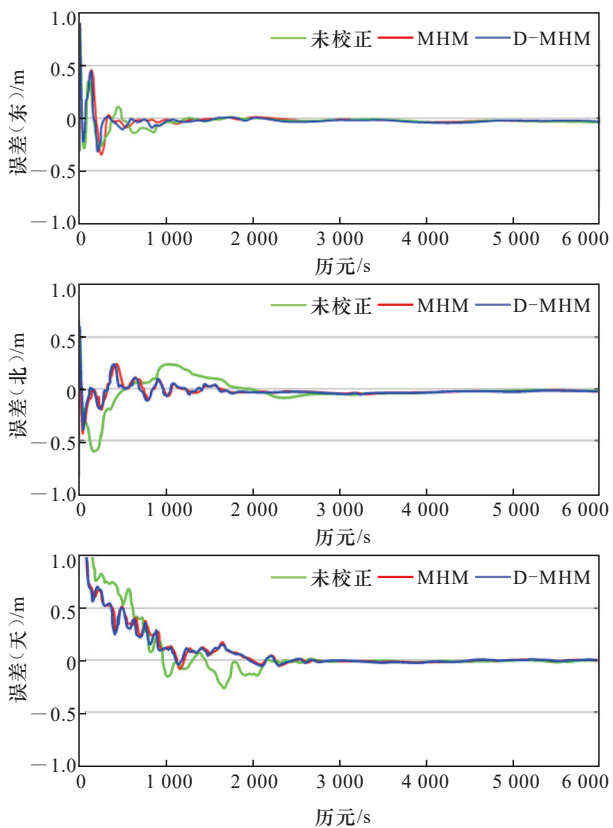


图 9 东(上)、北(中)、天(下)方向定位误差
Fig.9 Positioning errors in E, N, and U directions

收敛的初期阶段效果更明显,同时其更快的收敛速度也有助于将其应用到实时性要求更高的场景中。

如表 4 所示,使用 D-MHM 和 MHM 两种模型进行多径校正后的定位误差均方根误差(RMSE)均有

减小,D-MHM相较MHM在东、北、天三个方向上的定位精度改善效果分别提升了8.1%,5.6%,6.7%。

表 4 东、北、天方向定位误差 RMSE
Table 4 Positioning errors' RMSE in E, N, and U

项目	误差(东)	误差(北)	误差(天)
未校正	0.082 3	0.065 5	0.124 4
MHM	0.061 4	0.052 2	0.093 5
D-MHM	0.056 4	0.049 3	0.087 2
提升百分比/%	8.1	5.6	6.7

4 结论

本文利用 PPP 技术从 GNSS 载波相位残差中直接提取多径,提出一种利用多径空间重复性特点进行多径抑制的动态多路径半球图模型(D-MHM)。在对多径信号建模时,使用等面积原则划

分接收机上空网格,利用统计学原理对其中的残差数据进行检验,设置了建模阈值,保证了每个网格中均值计算的可靠性。同时,创新地加入了二次建模的过程,在保留一次建模高精度多径校正值的基础上,通过动态调整网格的分辨率,对未建模区域进行二次建模,在保证建模精度的同时提升了模型的覆盖范围。实验结果表明,在最佳网格分辨率、残差阈值和最佳建模天数的条件下,D-MHM 模型的多径校正率较原始的 MHM 模型可以提升约 7.7%,在东、北、天三个方向上的定位精度改善效果分别可提升 8.1%,5.6%,6.7%,具有更好的多径抑制效果。本研究可以用于提升户外静态定位的精度,同时由于 D-MHM 模型能建模接收机周围的多径环境,监测信号环境的动态变化,因此它还可以在地震波监测等领域提供实际应用价值^[14]。

参考文献:

[1] 孙波,王新志,陈发源,等. 利用SG平滑滤波优化GNSS-R潮位反演[J]. 南京信息工程大学学报,2022,16(2):270-278.
SUN B, WANG X Z, CHEN F, et al. Optimize GNSS-R tide level inversion via Savitzky-Golay smoothing filtering[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology, 2024, 16(2): 270-278.

[2] 杨元喜. 北斗卫星导航系统的进展、贡献与挑战[J]. 测绘学报,2010,1(1):1-6.
YU X Y. Progress, contributions and challenges of the BeiDou Satellite Navigation System[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2010, 1(1): 1-6.

[3] ZUMBERGE J F, HEFLIN M B, JEFFERSON D C, et al. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1997, 102(B3): 5005-5017.

[4] PSIMOUKIS P A, HOULIÉ N, BEHR Y. Real-time magnitude characterization of large earthquakes using the predominant period derived from 1 Hz GPS data[J]. Geophysical Research Letters, 2018, 45(2): 517-526.

[5] ZHENG K, ZHANG X, LI X, et al. Capturing coseismic displacement in real time with mixed single- and dual-frequency receivers: application to the 2018 Mw7.9 Alaska earthquake[J]. GPS Solutions, 2019, 23(1): 9.

[6] 刘经南,陈俊勇,张燕平,等. 广域差分GPS原理与方法[M]. 北京:测绘出版社,1999.

[7] HOFMANN-WELLENHOF B, LICHTENEGGER H, WASLE E. GNSS-global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more[M]. Austria: Springer Vienna, 2008.

[8] 周晓卫,戴吾蛟,朱建军,等. HVF方法在GPS多路径效应研究中的应用[J]. 大地测量与地球动力学,2007,27(1): 107-111.
ZHOU X W, DAI W J, ZHU J J, et al. Hvfmethao and ITS application in the study on GPS multipath effects[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2007, 27(1): 107-111.

[9] COHEN C E, PARKINSON B W. Mitigating multipath error in GPS based attitude determination[J]. Guidance and Control, 1991: 53-68.

[10] FUHRMANN T, LUO X, KNOPFLER A, et al. Generating statistically robust multipath stacking maps using congruent cells[J]. GPS Solution, 2015, 19(1): 83-92.

[11] DONG D, WANG M, CHEN W, et al. Mitigation of multipath effect in GNSS short baseline positioning by the multipath hemispherical map[J]. Journal of Geodesy, 2016, 90(3): 255-262.

[12] GENRICH J F, BOCK Y. Rapid resolution of crustal motion at short ranges with the global positioning system[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1992, 97(B3): 3261-3269.

[13] CAI M M, WEN C, DONG D, et al. Reduction of kinematic short baseline multipath effects based on multipath hemispherical map[J]. Sensors, 2016, 16: 1677.

[14] ZHENG K, XIAO H, PAN L, et al. Multipath extraction and mitigation for high-rate multi-GNSS precise point positioning[J]. Journal of Geodesy, 2019, 93(10): 2037-2051.

[15] WANG Z R, WEN C, DONG D, et al. Multipath mitigation based on trend surface analysis applied to dual-antenna receiver

- with common clock[J]. GPS Solutions, 2019, 23(4): 104.
- [16] WANG Z, CHEN W, DONG D, et al. An advanced multipath mitigation method based on trend surface analysis[J]. Remote Sensing, 2020, 12(21): 3601.
- [17] ZOU X, LI Z, LI Y, et al. A novel method to mitigate the multipath error for BDS-2 dam deformation monitoring[J]. Remote Sensing, 2021, 13(9): 1787.
- [18] REN H X, LI G C, GENG J H, et al. Multipath hemispherical map model with geographic cut-of elevation constraints for real-time GNSS monitoring in complex environments[J]. GPS Solutions, 2023, 27(4): 188.
- [19] YUAN H J, ZHANG Z T, HE X F, et al. Multipath mitigation in GNSS precise point positioning using multipath hierarchy for changing environments[J]. GPS Solutions, 2023, 27(4): 193.
- [20] LEHMANN E, ROMANO J. Testing statistical hypotheses[M]. New York: Springer, 2005.

(编辑: 万 佳)